

К. О. Бурак¹, Б. О. Лиско¹, К. А. Ярош²¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна² Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна**ОСОБЛИВОСТІ КООРДИНАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗПАНУВАЛЬНИХ РОБІТ НА БУДІВНИЦТВІ GNSS МЕТОДОМ**

Запропоновано оптимальну методику створення геодезичної основи на будівництві для однієї чи комплексу споруд, об'єднаних одним технологічним циклом. Наведені технологічні рішення вирішують такі основні проблеми під час виконання розмічувальних робіт на будівельному майданчику, як дотримання принципу підвищення точності при переході від вищого ступеня до нижчого та відсутності впливу похибок, спричинених проектуванням на референц-еліпсоїд та на дотичний циліндр у проекції Гауса-Крюгера. Обґрунтовано можливість виконання основних розмічувальних робіт на всій території триградусної зони RTN методом, забезпечуючи необхідну взаємну точність елементів будівництва 3-5 см. Встановлено, що загальна поправка переходу на площину в проекції Гауса-Крюгера для місцевої системи координат Івано-Франківської області (МСК-26) не перевищує відносну похибку 1/4000. Згідно з отриманим результатом можна рекомендувати картографічні проекції для виконання зйомок навіть у масштабі 1:500. Доведено, що для описаного випадку ортогональну проекцію на горизонтальну площину можна вважати такою, що збігається з топоцентричною системою координат. Хоча при такому виборі координатної площини, напрямки та довжини ліній теоретично повинні відрізнятися на величини, зумовлені відхиленням прямокутної лінії від нормалі при переході на референц-еліпсоїд. Однак, враховуючи розміри будівельного майданчика, для більшості інженерно-геодезичних задач цим впливом можна нехтувати.

Ключові слова: GNSS; картографічні проекції; координати; розпланувальні роботи; УСК 2000.

Вступ. Забезпечення необхідної точності виконання вишукувальних та розмічувальних інженерно-геодезичних робіт для будівництва є відповідальним та трудомістким процесом. Зважаючи на високі темпи розвитку міст, з'являється необхідність удосконалення наявних та розроблення нових методів геодезичного забезпечення будівництва, які будуть задовольняти нормативні вимоги точності. Найперспективнішими, на нашу думку, під час створення геодезичної розмічувальної мережі будівництва є використання Real Time Networks (RTN) вимірів (з використанням мереж референсних станцій), про які навіть не згадується у чинних, найбільш сучасних нормативних документах (DBN V.1.3.-2, 2010; Yvapun, 1957) хоча переваги RTN-методів (виміри можна виконувати одним приймачем, одержувати результати без пост опрацювання практично за секунди (Burak & Lysko, 2017a, 2017b, 2018, Smith et al., 2014; Bonenberg, 2014; Kizil & Tisor, 2011 тощо) є більш ніж очевидні.

Звичайно координати елементів будівництва відомі у проектній системі координат генплану (будівельної сітки), а геодезична розмічувальна основа, для прикладу в УСК-2000, тоді в разі використання GNSS вимірів, виникає задача встановлення параметрів переходу між цими системами з можливістю врахування як похибок вимірів, так і відбракування можливих грубих похибок.

Матеріал і методи дослідження. Для більшості інженерно-геодезичних робіт, зокрема геодезичного супроводу будівництва, є необхідність визначення та винесення в натуру саме натуральних віддалей і кутів (Votenko, Shults & Medvedskyi, 2009). Водночас координати опорних пунктів самого генплану відомі у проекції Гауса-Крюгера у поєднанні з нормальною висотою (УСК 2000 та похідні від неї 26 місцевих систем координат, в подальшому будемо їх називати картографічними). Визначені за цими картографічними координатами довжини ліній відрізняються від проектних на величину, зумовлену проектуванням на референц-еліпсоїд (поправка – Δ_H) та на дотичний циліндр у проекції Гауса-Крюгера, або січний у проекції UTM (поправка – Δ_Γ):

$$\Delta_H = -S \times \frac{H_m}{R_m}, \quad (1)$$

$$\Delta_\Gamma = +S \times \frac{y_m^2}{2R_m^2}, \quad (2)$$

де: H_m – середня висота вимірної сторони, для будівельного майданчика; S – горизонтальне прокладення віддалі між точками; R_m – середній радіус кривизни еліпсоїда; y_m – середнє значення із перетворених ординат кінців лінії.

Інформація про авторів:

Бурак Костянтин Омелянович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри геодезії та землеустрою.

Email: burak4111945@gmail.com

Лиско Богдан Олегович, асистент, кафедра геодезії та землеустрою. Email: 93lisko@gmail.com

Ярош Костянтин Анатолієвич, студент, кафедра прикладної математики. Email: 93lisko@gmail.com

Цитування за ДСТУ: Бурак К. О., Лиско Б. О., Ярош К. А. Особливості координатного забезпечення розпланувальних робіт на будівництві GNSS методом. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 7. С. 151–155.

Citation APA: Burak, K. O., Lysko, B. O., & Yarosh, K. A. (2019). Features of Coordinate Support for Planning Work on the Gns Construction Method. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(7), 151–155. <https://doi.org/10.15421/40290730>

Оскільки поправки Δ_Γ і Δ_H із протилежними знаками, то частково загальна поправка компенсується. Ця загальна поправка за перехід на площину в проекції Гауса-Крюгера, як і UTM, матиме вигляд

$$\frac{\Delta_{ред}}{S} = \frac{\Delta_\Gamma + \Delta_H}{S} = \frac{y_m^2}{2R_m^2} - \frac{H_m}{R_m}. \quad (3)$$

Розглянемо частковий випадок, коли вибір розміщення будівельного майданчика відносно осевого меридіана та висот місцевості збігаються, так, щоб сума цих двох поправок дорівнювала:

$$\Delta_\Gamma = \Delta_H; \quad (4)$$

$$S \times \frac{y_m^2}{2R_m^2} = S \times \frac{H_m}{R_m}. \quad (5)$$

Звідси, якщо задана величина H_m , то

$$y_m = \sqrt{2R_m \times H_m}. \quad (5)$$

Якщо відома величина y_m , то

$$H_m = \frac{y_m^2}{2R_m}. \quad (6)$$

Отже, якщо будівництво ведеться, для прикладу, на віддалі 14 км від осевого меридіана, то для того щоб поправка (3) дорівнювала нулю, висота поверхні H_m повинна дорівнювати

$$H_m = \frac{14^2}{2 \times 6371} = 15,4 \text{ м}. \quad (7)$$

До того ж, саме такий вибір поверхні відносності рекомендують у роботі (Yvanov, 1957). Водночас середні висоти для цієї місцевості 250-300 м, що робить такий підбір практично не реальним, тому різниця між натуральною довжиною лінії та визначеною за координатами в УСК-2000 буде дорівнювати 1/25 000 довжин ліній на генплані (рис. 1).

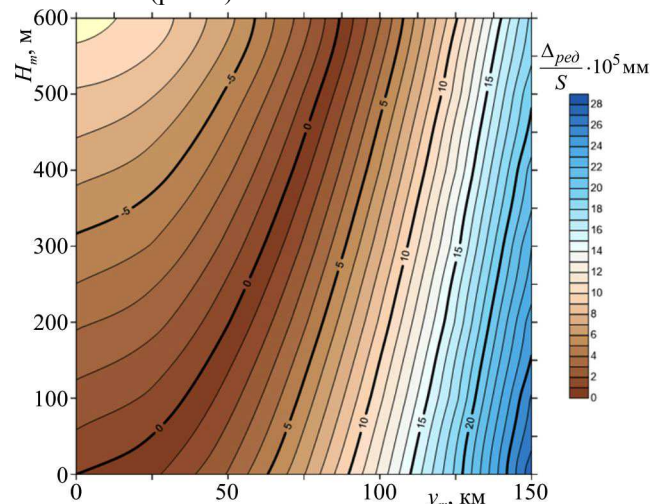


Рис. 1. Розподіл загальної поправки переходу на площину в проекції Гауса-Крюгера залежно від віддалі до осевого меридіана та середньої висоти виміряної сторони

На рис. 1 проілюстровано загальну поправку переходу на площину в проекції Гауса-Крюгера, згідно з формулою (3). По осі абсцис відкладено значення віддалі y_m від осевого меридіана до промайданчика в кілометрах, а по осі ординат – середню висоту H_m виміряної сторони в метрах. Для наочності отриманих значень всі коефіцієнти, що наведені на графіку, помножені на 10^5 (що відповідає довжині лінії 100 м). Наприклад, за середньої висоти будівельного майданчика 300 м та його віддаленості від осевого меридіана 100 км максимальна поправка при винесенні ліній довжиною 100 м, за редукування становить – 10 мм. За

більших довжин ліній значення поправки буде пропорційно зростати, за тих же умов поправка для віддалі 300 м становитиме 30 мм, проте відносна похибка не перевищить 1/10000 для усіх випадків. Аналіз рис. 1 показує, що у триградусній зоні максимальна відносна похибка не перевищує 1/4000, тому при виконанні зйомок, навіть у масштабі 1:500, нею можна нехтувати. Це ж стосується і першого етапу основних розпланувальних робіт. Цей етап полягає в тому, що від геодезичних пунктів виносять і закріплюють головні розмічувальні осі. Нормативна точність цих робіт повинна становити 3-5 см. Згідно з отриманими результатами, які відображені на рис. 1, можна стверджувати, що необхідна точність на першому етапі розпланувальних робіт досягається навіть на краю зони при полярних віддалях до 100 м. Водночас на віддалі до 50 км від осевого меридіана можна виносити в натуру базисні сторони довжиною навіть до 1 км.

Також варто зазначити, що при пошуку параметрів трансформування для цих випадків масштабний коефіцієнт m можна приймати таким, що дорівнює 1. Проте для забезпечення міліметрової точності, яка потрібна для детальних розпланувальних робіт, картографічними координатами можемо користуватись тільки у вузькій смузі – від 40 до 60 км від осевого меридіана (за середньої висоти майданчика 300 м).

Розглянемо випадок, коли необхідно враховувати різницю у довжинах ліній, винесених за картографічними координатами в УСК-2000 і проектними довжинами, наприклад на краю триградусної зони при полярних віддалях більше 100 м, а також на другому етапі розпланувальних робіт.

Нормативна точність другого етапу розпланувальних робіт (винесення основних осей) становить 3-5 мм (DBN V.1.3.-2, 2010; Manual, 2019). За результатами досліджень точності RTK RTN вимірів у мережі, наприклад System Solutions (Burak & Lysko, 2017a, 2017b, 2018), було встановлено, що середня квадратична похибка виміру кута та віддалі не перевищує $m_{кут} = 4,3''$ та $m_{від} = 3,2$ мм відповідно. Для статичних, синхронних вимірів досягнута точність навіть більша (Savchyn & Duma, 2016; Medvedskyi, 2010), що дає змогу використовувати GNSS виміри і на другому етапі розмічувальних робіт, або хоча б як контроль вимірів електронним тахеометром.

Для забезпечення високої точності розпланувальних робіт (3-5 мм) рекомендуємо додатково використовувати топоцентричну прямокутну систему координат (Savchuk, 2000). Ця необхідність обґрунтовується специфікою задачі: порівняно малі віддалі між точками (100-200 м) та використання GNSS приймача. У такому разі трансформування пунктів необхідно виконувати в два етапи: спочатку визначити геоцентричні координати опорних базисів (проектні координати яких відомі згідно з технологічними кресленнями), після чого за формулами (13)-(19) перейти до запропонованої координатної площини. За неї приймається площина не геодезичного горизонту, а горизонтальна площина, як на генплані, із віссю x , напрямленою у площині геодезичного меридіана. Ця математична основа буде найкращим рішенням для геодезичного забезпечення окремого будівельного майданчика. У разі використання ортогональної проекції на горизонтальну площину у прямокутній декартовій системі координат у виміряні величини не вводяться поправки для переходу на поверхню відносності та на

женого на рис. 3, доцільно винести як базові пункти A , B і C – на перетині створів наявної будівлі та запроєк-

тованих точок основної осі 16-15. Точки A та C можна винести навіть і за картографічними координатами.

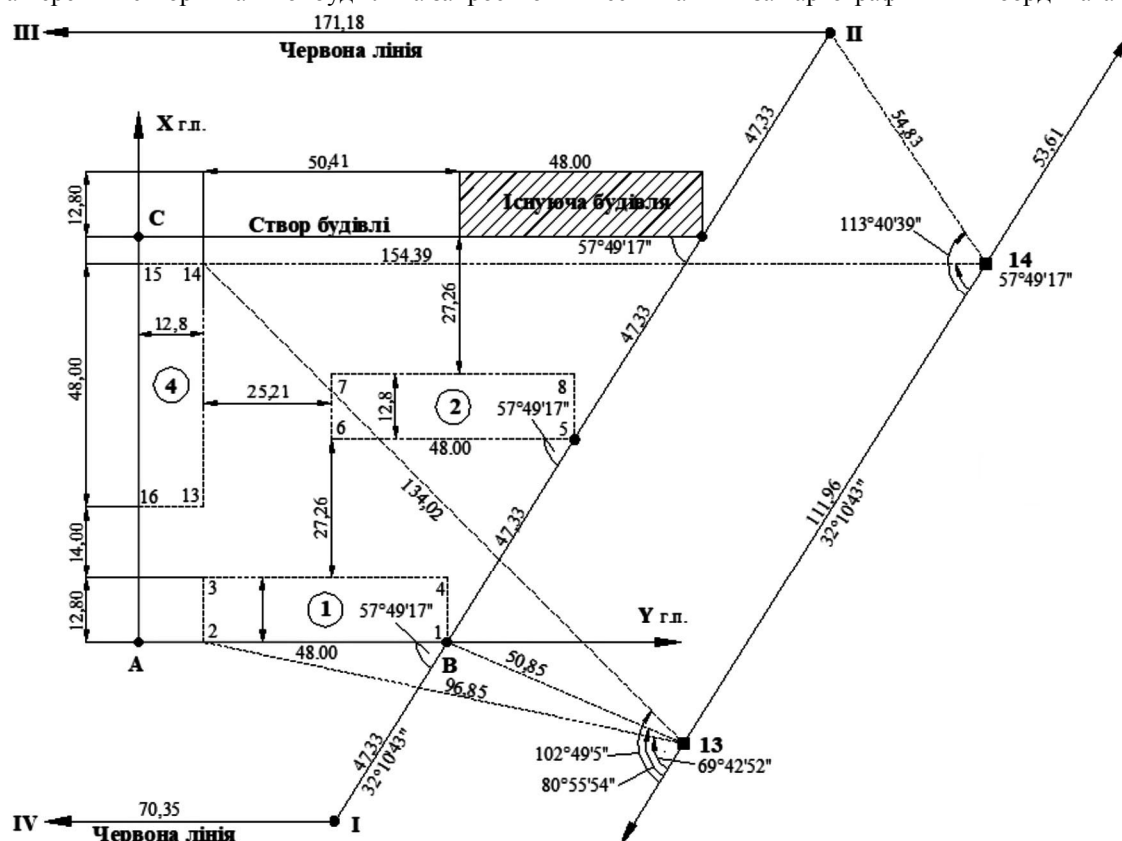


Рис. 3. Розмічувальне креслення групи будинків мікрорайону: 13-14 – пункти геодезичної основи; I-VI – пункти червоних ліній

Після закріплення базисів у натурі визначаємо координати методом GNSS – X_A, X_B, Y_A, Y_B – геоцентричні координати точок базису, B_A, L_A, B_B, L_B – геодезичні координати точки B базису, а також для контролю координати точок червоних ліній, від яких виконано проектування розміщення споруд.

Обов'язково аналізуємо одержані координати точок червоних ліній на можливі грубі помилки у координатах, визначаючи за геоцентричними координатами GNSS віддалі між ними (за формулою (1)) та порівнюючи їх з технологічними розмірами. У разі виявлення помилок, узгоджуємо це питання з проектантом.

Для винесення контуру споруди – основних осей – знаходимо за проектними координатами точок, які будуть закріплювати контур споруди, і проектними координатами точок базису, їх топоцентричні координати за формулами, які представимо у вигляді:

$$x_{ТЦ} = S \cos A, \quad y_{ТЦ} = S \sin A, \quad (13)$$

де: S – віддаль від початку координат до точки; A – азимут до точки.

Віддаль від початку координат до точки визначають за формулою

$$S = \sqrt{\Delta x_{A-1}^2 + \Delta y_{A-1}^2}, \quad (14)$$

де Δx_{A-1} , Δy_{A-1} – різниця проектних координат точки A (початку проектної системи координат) і 1, яку виносять в натуру.

Азимут до точки визначають за формулою

$$A = A_{поч} + \beta, \quad (15)$$

де β – азимут, що дорівнює $\beta = \arctg \frac{\Delta y_{A-1}}{\Delta x_{A-1}}$; $A_{поч}$ – геодезичний (від площини геодезичного меридіану) ази-

мут базисної лінії AB , який визначається із результатів GNSS вимірів на точках базису. Для нашого випадку його можна обчислити за формулами:

$$\begin{bmatrix} x'_B \\ y'_B \end{bmatrix} = P'_B \begin{bmatrix} X_A - X_B \\ Y_A - Y_B \end{bmatrix}, \quad (16)$$

де: P'_B – матриця перетворення; X_A, X_B, Y_A, Y_B – геоцентричні координати точок базису;

$$P'_B = \begin{bmatrix} -\sin B_B & -\sin B_B \sin L_B & \cos B_B \\ -\sin L_B & \cos L_B & 0 \\ \cos B_B \cos L_B & \cos B_B \sin L_B & \sin B_B \end{bmatrix}, \quad (17)$$

де B_B, L_B – геодезичні координати точки B базису.

Відповідно, геоцентричні координати проектних точок, які потрібно винести в натуру, використовуючи GNSS приймач, знаходимо за відомими формулами:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} x_{ТЦ} \\ y_{ТЦ} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

де P – матриця повороту, елементи якої геодезичні координати вихідної точки;

$$P'_B = \begin{bmatrix} -\sin B_A & -\sin L_A & \cos B_A \cos L_A \\ -\sin B_A \sin L_A & \cos L_A & \cos B_A \sin L_A \\ \cos B_A & 0 & \sin L_A \end{bmatrix}, \quad (19)$$

де B_A, L_A – геодезичні координати точки B базису.

Для обчислень геоцентричних координат за координатами точок генплану ми розробили програмний комплекс, який дає змогу скоротити час на проведення обчислень. Використовуючи GNSS приймач, за знайденими координатами WGS виносямо і закріплюємо в натурі головні та основні осі.

Для контролю виносямо ці ж точки від базових ліній електронним тахеометром, оскільки це описано в

роботах (Burak & Lysko, 2018; Kizil & Tisor, 2011). Збір у натурі точок, винесених GNSS та розпланованих електронним тахеометром методом від базисної лінії, буде відрізнятися контролем як для польових, так і камеральних робіт.

Пропонована методика випробувана під час детального розпланування контуру будівлі як на експериментальному полігоні, так і при винесенні в натуру контурів (основних осей) реальних будівель. Результати підтвердили високу оперативність та точність виконання робіт. Потреба в редуціюванні винесених пунктів, що закріплюють контур споруди, якщо і виникала, то редуційні величини в усіх випадках були меншими 10 мм. Ці результати було отримано при використанні примусового та оптичного центрування GNSS приймача.

Висновки. Розроблено практичні рекомендації для створення геодезичної розмічувальної основи на будівництві, що забезпечують необхідну планову точність згідно з чинними нормами та значно зменшують затрати часу на виконання геодезичних робіт на будівельному майданчику.

Доведено можливість виконання основних розмічувальних робіт на всій території триградусної зони RTN методом, із забезпеченням необхідної взаємної точності (3-5 см) елементів будівництва.

Встановлено, що загальна поправка переходу на площину в проекції Гауса-Крюгера для місцевої системи координат Івано-Франківської області (МСК-26) не перевищує відносно похибки 1/4 000.

Перелік використаних джерел

- Baran, P. I. (2012). *Engineering geodesy*. Kyiv: Vipol. [In Ukrainian].
 Bonenberg, L. K. (2014). *Closely-coupled integration of Locata and GPS for engineering applications*. PhD thesis. University of Nottingham. 184 p.
 Burak, K. O. (2011). Planning and executive shooting technology using TPS. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 75, 53–57. [In Ukrainian].
 Burak, K. O., & Lysko, B. O. (2017a). Exploring the accuracy of lengths constructions when solving the engineering geodesy issues

- with RTN method. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 85, 5–12
 Burak, K. O., & Lysko, B. O. (2017b). Results of investigating the accuracy of rtn methods of gnss measurements by the single basic solution. their usage for the marking works during the construction. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(6), 145–150. <https://doi.org/10.15421/40270629>
 Burak, K. O., & Lysko, B. O. (2018). The possible uses of RTN solutions for markup works on construction. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 87, 18–23.
 DBN V.1.3.-2:2010. *Systema zabezpechennia tochnosti heometrychnykh parametriv v budivnytstvi. Heodezychni roboty v budivnytstvi*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. [In Ukrainian].
 Dvulit, P. D., Dzhuman, B. B., & Smelianets, O. V. (2012). Model of gravimetric components of deviations of straight lines of the territory of Ukraine according to EGM 2008. *Heodynamiika*, 1(12), 30–35. [In Ukrainian].
 Kizil, U., & Tisor, L. (2011). Evaluation of RTK-GPS and Total Station for applications in land surveying. *Journal of Earth System Science*, 120, 215–221.
 Manual. (2019). *Topographic Survey Manual in Scales 1: 5000, 1: 2000, 1: 1000 and 1: 500*. Retrieved from: <http://www.geoguide.com.ua/basisdoc/basisdoc.php?part=tgo&art=350>
 Medvedskyi, Yu. V. (2010). Methods of experimental studies of the accuracy of construction of geodetic base on the mounting horizon GNSS-method. *Inzhenerna heodeziia*, 56, 53–56.
 Savchuk, S. H. (2000). *Higher geodesy (Spheroid Surveying)*. Lviv: Liha-Pres. [In Ukrainian].
 Savchyn, I. R., & Duma, M. V. (2016). Optimization of the GNSS reference network of the Dniester HPP. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 10, 17–24. [In Ukrainian].
 Smith, D., Choi, K., Prouty, D., et al., (Eds.) (2014). Analysis of the TXDOT RTN and OPUS-RS from the geoid slope validation survey of 2011: *Case study for Texas*. *Journal of Surveying Engineering*. 140. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000136.05014003](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000136.05014003)
 Voitenko, S. P., Shults, R. V., & Medvedskyi, Yu. V. (2009). Modern methods of transfer of coordinates of spatial geodetic network points to the mounting horizon. *Budivnytstvo Ukrainy*, 9, 21–24. [In Ukrainian].
 Yvanov, N. Y. (1957). O vybore poverkhnosti proektyrovaniya tryanuliatsyy pry ynzhenemo-heodezycheskykh yzyskaniakh y horodskykh semkakh. *Heodeziia y kartohrafiia*, 2, 36–39. [In Russian].

K. O. Burak¹, B. O. Lysko¹, K. A. Yarosh²

¹ Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

² Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

FEATURES OF COORDINATE SUPPORT FOR PLANNING WORK ON THE GNSS CONSTRUCTION METHOD

Some practical recommendations for building the geodesic marking construction base, that will provide the accuracy and save time of geodesic works on the construction site, are provided in the article. These recommendations will allow refusing from building the classic construction netting and conducting planning works with GNSS receiver by using RTN methods and modern electronic total stations (TS). To build the graticule on the construction site, we should mark two basis AB and CD in-situ with GNSS receiver, so they are parallel to the x and y axes of the general plan on which the site is projected. Then, we will mark the axes, using the method from the basic line as described in the work (TS). To solve the problem, one has to know only the coordinates x and y of one basis point and set the position angle of the line to 0° or 90°. Theoretically all planning works may be done from one base line, but we recommend to set at least two lines in order to provide the visibility on entire site including the possibility of losing important points during the construction works. During planning and marking works, GNSS measurements on the nearest observation points are made on the short distance from each other (not more than 1000 m), so the points will be located in ionospheric conditions and there will be a chance to see the same satellites. It allows confirming that influence of errors, entailed by ionospheric delays and satellite clock wrong time will be significantly decreased because of the compensation of their systematic component that will improve the accuracy of set base lines. The information mentioned above was proved by our research. According to research results, when following the recommendations (adequate amount of measurement averaging, distance to the closest permanent stations and geometry of their allocation), it is possible to get the accurate mutual location 3.18 mm (including the error of line orientation), and the accuracy of setting vectors – 2.52 mm on the distances less than 200 m. It is important to remember that points A, B, C, and D are set without such errors as device and viewfinder centering, as well as error of benchmark data.

Keywords: GNSS; map projections; coordinates; planning work; USC 2000.